

**Method and apparatus for recognition of a shaft rupture in a turbo-engine**

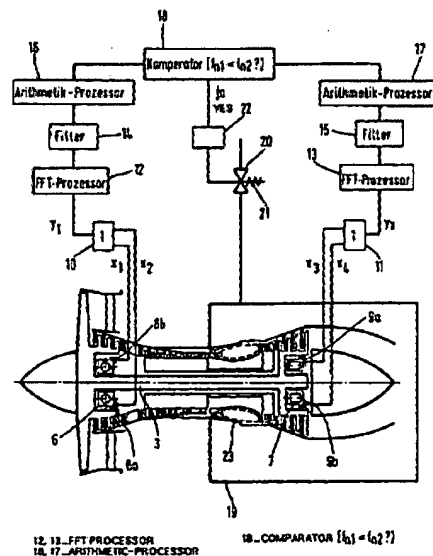
**Patent number:** DE19857552  
**Publication date:** 2000-06-15  
**Inventor:** HAYESS BURKHARD (DE)  
**Applicant:** ROLLS ROYCE DEUTSCHLAND GMBH (DE)  
**Classification:**  
- **international:** F01D21/14; F01K13/02; F02K3/00; F02C7/00; F02C9/46  
- **european:** F01D21/00; F01D21/02; F01D21/04B  
**Application number:** DE19981057552 19981214  
**Priority number(s):** DE19981057552 19981214

**Also published as:**

WO0036280 (A1)  
EP1055052 (A1)  
US6494046 (B1)  
EP1055052 (B1)

**Abstract of DE19857552**

The invention relates to a method of recognition of a shaft rupture in a turbo-engine with the purpose of initiating a suitable speed range limiting measure, especially an emergency shut-down of the fuel supply in a gas turbine system of an aircraft. According to the inventive method, a torque-supplying turbine rotor and a torque-absorbing unit are linked with one another via the shaft (3) which is to be monitored for a rupture and the ends of which are arranged on at least two roller bearings (6, 7). The rotary frequencies ( $f_{n1}$ ,  $f_{n2}$ ) of the two ends of the shaft in the roller bearings (6, 7) of the shaft (3) are detected and compared continuously and substantially in real time. If the rotary frequency ( $f_{n1}$ ) at the roller bearing (7) at the turbine rotor's end is higher than the rotary frequency ( $f_{n2}$ ) at the roller bearing (6) of the torque-absorbing unit, rupture of the shaft (3) is assumed. Preferably, the rotary frequency of the respective end of the shaft is determined via fast-Fourier transmission and an arithmetic processor for both roller bearings (6, 7) via separate measuring channels. The measurement is based on one or several typical roller bearing frequencies that are emitted by said roller bearings when they rotate.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 198 57 552 A 1**

⑤1 Int. Cl.7:  
**F 01 D 21/14**  
F 01 K 13/02  
F 02 K 3/00  
F 02 C 7/00  
F 02 C 9/46

②1 Aktenzeichen: 198 57 552.1  
②2 Anmeldetag: 14. 12. 1998  
④3 Offenlegungstag: 15. 6. 2000

DE 198 57 552 A 1

⑦1 Anmelder:  
Rolls-Royce Deutschland GmbH, 61440 Oberursel,  
DE

⑦2 Erfinder:  
Hayess, Burkhard, Dr., 15834 Rangsdorf, DE

⑤6 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
zu ziehende Druckschriften:

DE 195 24 992 C1  
DE 31 26 069 C2  
DE 197 27 296 A1

JP 4-287803 A., In: Patents Abstracts of Japan,  
M-1371, Feb. 23, 1993, Vol. 17, No. 92;

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

⑤4 Verfahren zum Erkennen eines Wellenbruches in einer Strömungskraftmaschine

⑤7 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Erkennen eines Wellenbruches in einer Strömungskraftmaschine mit dem Ziel, danach eine geeignete drehzahlbegrenzende Maßnahme, insbesondere eine Brennstoffschnellschaltung bei einer Flug-Gasturbinenanlage, einzuleiten, wobei ein drehmomentabgebender Turbinenläufer und ein drehmomentaufnehmendes Aggregat über die hinsichtlich eines Bruches zu überwachende, im wesentlichen endseitig in zumindest zwei Wälzlager gelagerte Welle miteinander verbunden sind.

Erfindungsgemäß werden die Drehfrequenzen der beiden Wellenenden in den Wälzlager der hinsichtlich eines Bruches zu überwachenden Welle kontinuierlich und im wesentlichen in Echtzeit ermittelt und miteinander verglichen, wobei bei einer gegenüber der Drehfrequenz am Wälzlager des drehmomentaufnehmenden Aggregates höheren Drehfrequenz am turbinenläuferseitigen Wälzlager auf einen Bruch der Welle geschlossen wird. Bevorzugt erfolgt mittels Fast-Fourier-Transformation und eines Arithmetik-Prozessors für beide Wälzlager über getrennte Meßkanäle die Bestimmung der Drehfrequenz des jeweiligen Wellenendes unter Rückgriff auf eine oder mehrere typische Wälzlagerfrequenzen, die von diesen Wälzlager bei deren Rotation emittiert werden. Ein solches Meßverfahren zeichnet sich durch höchste Schnelligkeit aus.

DE 198 57 552 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Erkennen eines Wellenbruches in einer Strömungskraftmaschine mit dem Ziel, danach eine geeignete drehzahlbegrenzende Maßnahme, insbesondere eine Brennstoffschnellabschaltung bei einer Flug-Gasturbinenanlage, einzuleiten, wobei ein drehmomentabgebender Turbinenläufer und ein drehmomentaufnehmendes Aggregat über die hinsichtlich eines Bruches zu überwachende, im wesentlichen endseitig in zumindest zwei Wälzlager gelagerte Welle miteinander verbunden sind.

Insbesondere für Flugtriebwerke, aber auch für Industriegasturbinen zur Energieerzeugung sind eine Reihe von Verfahren und Vorrichtungen bekannt geworden, die alle den Zweck verfolgen, daß sie wirksam eine Drehzahlbegrenzung bei nicht mehr erfolgreicher Lastabnahme durch das drehmomentaufnehmende Aggregat gewährleisten. Ziel ist es, ein unkontrolliertes Anwachsen der Drehzahl bis zur Selbstzerstörung der Strömungskraftmaschine, insbesondere Verbrennungs-Strömungskraftmaschine, zu unterbinden und Gefährdungen für Menschen und Sachwerte auszuschließen. Derartig kritische Betriebszustände können sich z. B. bei Energieerzeugungsanlagen in Kraftwerken mit Verbrennungs-Strömungskraftmaschinen bei einer unkontrollierten Trennung zwischen dem Generator und dem elektrischen Landesnetz (Lastabwurf) einstellen. Ebenso kann ein Bruch der Welle zwischen dem energieabgebenden System, d. h. dem Turbinenläufer und dem energieaufnehmenden System, insbesondere einem Verdichter, zu einem unkontrollierten Drehzahlanstieg des erstgenannten führen. Im Fall eines Flugtriebwerkes bzw. einer Flug-Gasturbinenanlage kann ein solches energieaufnehmendes bzw. drehmomentaufnehmendes System der Fan sein.

Drehzahlbegrenzende Einrichtungen für Flugtriebwerke für den Fall eines Wellenbruches zwischen dem energiekonsumierenden Teil (z. B. dem Verdichter) und dem energieerzeugenden Teil (z. B. dem Turbinenläufer) wurden in einer Reihe von bekannten Erfindungen durch ein mechanisches Wirkprinzip derart gestaltet, daß es zu einer axialen Relativbewegung zwischen dem Leitapparat und den Laufschaufeln des Turbinenläufers dergestalt kommt, daß eine Kollision zwischen dem Leitapparat und den Laufschaufeln erzeugt wird. Bei dieser Kollision (auch "Tangling" genannt) wird die Rotationsenergie des Turbinenläufers bis zum Stillstand des Turbinenläufers durch Verformung, Reibung und Zerstörung der betroffenen Turbinenbeschaufelung abgebaut. Für dieses Wirkprinzip seien die Patentschriften US 4.505.104, US 4.503.667 und US 4.498.291 als Beispiele genannt.

Für Energieerzeugungsanlagen mit Gasturbinen sowohl als auch für Kombi-Kraftanlagen mit Gasturbinen ist der Fall eines Wellenbruches eher unwahrscheinlich. Von größerer Bedeutung ist hier der sogenannte Lastabwurfsfall. In einem solchen Störfall muß ebenso ein unkontrolliertes Ansteigen der Drehzahl des Turboaggregates vermieden werden. Die gleiche Aufgabe ist auch bei Lastabwurf bei Block-Kraftwerken zu lösen, die mit Kolbenmaschinen als Antrieb ausgerüstet sind. Hierzu sind technische Lösungen bekannt geworden, die z. B. auf der Basis hydraulischer Aggregate beruhen und die auch bei Verbrennungs-Strömungskraftmaschinen Anwendung finden. Dabei wird über eine Hydraulikölpumpe, die mit der Antriebswelle der Verbrennungs-Strömungskraftmaschine verbunden ist, ein der Drehzahl proportionaler Druck im Hydrauliköl erzeugt. Durch entsprechende Vergleichsglieder wird der Hydrauliköldruck mit einem Sollwert verglichen und bei Überschreitung wird entweder die Brennstoffzufuhr abgeschaltet oder wirksam ge-

drosselt, so daß die Verbrennungs-Strömungskraftmaschine abgeschaltet wird oder auf Leerlaufdrehzahlniveau weiter betrieben wird. Eine ähnliche Lösung ist auch für eine Dampfturbine in der US 5.292.225 beschrieben, wobei hier als Stellglied die Dampfeinströmventile fungieren.

Ebenso wurde ein strömungsmechanisches Prinzip in der US 4.987.737 beschrieben, die eine Erkennung und Begrenzung von Überdrehzahlzuständen an Flugtriebwerken zum Inhalt hat. Hierbei wird der funktionale Zusammenhang zwischen dem Druckabfall über die Brennstoffdurchflußmeßeinrichtung bei entsprechendem Kraftstoffverbrauch und der Drehzahl der Flug-Gasturbine ausgenutzt. Wird ein Sollwert für den Druckabfall über der Brennstoffdurchflußmeßeinrichtung überschritten, so wird ein entsprechendes Stellsignal gebildet, und es erfolgt der begrenzende Eingriff in die Brennstoffversorgung.

Eine weitere Drehzahlbegrenzungseinheit ist in der US 5.003.769 beschrieben. Hierbei wird an eine Brennstoffpumpenwelle eines Flugtriebwerkes ein Tachometer angeschlossen. Das resultierende geschwindigkeitsproportionale Tachometersignal ist eine Funktion des Brennstoffverbrauches. Dieses digitale Meßsignal wird in den elektronischen Triebwerkssteuerungscomputer eingebunden und weiterverarbeitet. Über das elektronische Triebwerksmanagement wird dann bei entsprechenden Überdrehzahlzuständen auf die jeweiligen Stellglieder eingewirkt.

Eine weitere mechanische Lösung zur Begrenzung von Überdrehzahlzuständen bei einem Wellenbruch zwischen der Niederdruckturbine und dem Fan wird bei Flugtriebwerken mit kleineren Antriebsleistungen angewendet, wobei die Antriebswelle zwischen dem Fan und der Niederdruckturbine mit einer Referenzwelle ausgestattet ist. Kommt es zu einem Wellenbruch, so verändern die gebrochene Antriebswelle und die Referenzwelle ihre Position zueinander. Ein vorgespannter Mitnehmer wird freigegeben und verhakt sich in einer Drahtschlinge. Durch eine resultierende Zugbewegung an der Drahtschlinge infolge der sich weiterdrehenden Niederdruckturbine wird über den Seilzug eine Brennstoffschnellabschaltung realisiert.

Hinsichtlich einer elektronischen Lösung der Überdrehzahlproblematik wurde für eine Dampfturbine eine Schaltung in der US 4.474.013 veröffentlicht. Dort werden bis zu vier Geschwindigkeitssensoren verwendet, die redundant arbeiten und zu einer Zahnradwelle angeordnet sind. Die resultierenden Signale der Geschwindigkeitssensoren sind proportional zur Drehzahl der Zahnradwelle. Ein entsprechend gestaltetes elektronisches Meßdatensystem ist in der Lage, das Geschwindigkeitssignal zu differenzieren und eine Ableitung in Form der Beschleunigung zu bilden. Bei einer vorausbestimmten Überdrehzahlsituation durch Verarbeitung der ermittelten Beschleunigungswerte und bei Überschreitung einer Drehzahlschwelle wird auf die in Reihe geschalteten Frischdampfventile (ein Stop-Ventil und ein Regelventil) eingewirkt.

Eine weitere elektronische Lösung des Überdrehzahlproblems für eine Flug-Gasturbinenanlage ist in der US 4.712.372 dargelegt. An der gezahnten Turbinenwelle sind zwei Sensoren angeordnet, die ein der Zähneanzahl der Welle drehzahlproportionales Signal erzeugen. Beide Sensoren arbeiten zueinander redundant, wobei ein Kanal analog und der zweite eine digitale Signalverarbeitung und Signalweiterleitung realisiert. Im Fall einer von beiden Sensoren festgestellten Überdrehzahlsituation wird ein magnetisch gesteuertes Kraftstoffventil angesteuert und die Kraftstoffversorgung unterbrochen.

Ebenso bekannt geworden ist durch die US 4.635.209 eine elektronische Lösung zur Steuerung von Überdrehzahlzuständen, die eine Dampfturbine betreffen. Dabei wird das

Meßprinzip ebenfalls auf ein gepulstes Meßsignal aufgebaut, das an einer Zahnwelle erzeugt wird. Zur Verbesserung der Meßwertgenauigkeit werden drei voneinander unabhängige Meßkanäle an der gleichen Meßstelle eingesetzt. Einer der drei Meßkanäle arbeitet mit einer Überwachungsfunktion. Jeder der Meßkanäle kommuniziert über einen programmierbaren Computer.

Die bereits bekannten und veröffentlichten Systeme zur Überwachung und Begrenzung von Überdrehzahlzuständen unterteilen sich somit in mechanische und elektromechanische/elektronische Systeme.

Insbesondere bei Flugtriebwerken in der sog. dreiwelligen Ausführung kommt das weiter oben genannte "Tangling" bei einem Bruch der Antriebswelle zwischen Fan und Niederdruckturbinenläufer zum Einsatz, da hier bei einem Bruch der Antriebswelle zwischen Fan und Niederdruckturbine genügend Energie durch die Kollision zwischen Leitapparat und Laufschaufeln in der Turbine abgebaut werden kann. Für Triebwerke mit kleineren Antriebsleistungen (z. B. zweiwellige Ausführungen) konnte die Funktion des Tangling-Prinzips bisher noch nicht erfolgreich unter Beweis gestellt werden. Es wurde daher ein direkt mechanisch wirkendes Brennstoffabschaltssystem verwendet.

Ein kommerzieller Nachteil für ein dergestalt zu lösendes Problem besteht daher in der Vielzahl der verwendeten Systeme, die an die konkreten Bedingungen des jeweiligen Flugtriebwerkes auslegungsseitig neu angepaßt werden müssen. Kommonalität würde eine Kostenentlastung für einen Hersteller von Triebwerksfamilien bedeuten.

Die Anwendung des Tangling-Prinzips erfordert ein speziell für diesen Notfall ausgelegte Beschaukelung, damit sie funktionsgemäß ihre Aufgabe erfüllen kann. Um ein Flugtriebwerk für das Tangling-Konzept auszulegen, müssen Kompromisse hinsichtlich der Aerodynamik an der Beschaukelung eingegangen werden. Grundsätzlich ist aufgrund der aerodynamisch nicht optimalen Schaufelgestaltung der Turbine mit erhöhten Betriebskosten zu rechnen, die direkt durch den verlustbedingt höheren spezifischen Brennstoffverbrauch bestimmt sind.

Bei Flugtriebwerken, die nach dem Tangling-Prinzip einen Wellenbruch zwischen Fan und Niederdruckturbine sicher abfangen, ist stets mit dem Totalverlust der Beschaukelung bei entsprechend hohen Wiederbeschaffungskosten zu rechnen. Ein mechanisches System mit einer Referenzwelle ist im Anforderungsfall zumindest dem teilweisen Verlust von Komponenten unterworfen, neben dem Umstand, daß ein solches System zusätzliche Masse für das Triebwerk in der Größenordnung von ca. 20 bis 25 Pfund bedeutet. Derartig massebehaftete Systeme wirken sich neben dem Kosten nachteil immer negativ auf den Brennstoffverbrauch aus.

Das Masse-Kostenverhältnis mechanischer Lösungen zur Realisierung der geforderten Funktion einer Sicherheitsabschaltung bei einem Wellenbruch zwischen Fan und Niederdruckturbine ist aus Sicht der Herstellkosten und der Betriebskosten als nachteilig einzustufen. Elektromechanische oder elektronische Lösungen sind aus dem Blickwinkel der Gesamtkosten hier klar im Vorteil.

Bisherig bekannt gewordene elektromechanische und elektronische Lösungsvorschläge wurden bislang nur zur Überwachung einer Soll-Drehzahl von Rotoren verwendet. Wellenbrüche können mit derartigen Systemen bisher nicht erkannt werden. Insbesondere Flug-Gasturbinen größerer Leistungsklassen und Turbinen von industriellen Energiezeugungsanlagen, bei denen der Leichtbau keine Rolle spielt, verfügen über ein ausreichend hohes Trägheitsmoment, sodaß genügend Zeit verbleibt, um mit konventionellen elektromechanischen und elektronischen Methoden (Drehzahlmeßverfahren und Stellglieder) bei entsprechend

großen Tot- und Verzugszeiten einer Überdrehzahl entgegenzusteuern. Derartig angewendete Drehzahlmeßverfahren beruhen auf der Aufsummierung diskreter Einzelimpulse über einen Meßzeitraum. Für Flugtriebwerke kleinerer Antriebsleistungen wurden die bekannten elektromechanischen und elektronischen Verfahren bisher als technisch ungeeignet eingestuft, da sie in Verbrennungs-Strömungskraftmaschinen mit sehr kleinen Trägheitsmomenten im Anforderungsfall nicht schnell genug reagieren. Der erforderliche Meßzeitraum ist zu groß im Verhältnis zur Zeit, die verbleibt, um bei einem Wellenbruch bei kleineren Triebwerken schnell genug einen solchen Zustand zu erkennen, das erforderliche Stellsignal zu bilden und die Schnellabschaltung auszuführen.

Bisher bekannt gewordene Meßeinrichtungen für die Drehzahl und deren abgeleitete Größen, wie Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung, besitzen weiterhin eine zu geringe Empfindlichkeit bzw. Meßauflösung, so daß ein verwertbares Meßsignal nicht schnell genug für die Auslösung einer Schnellabschaltung und Drehzahlbegrenzung bereitgestellt werden kann.

Ein demgegenüber verbessertes, insbesondere kostengünstiges und sicheres Verfahren zum Erkennen eines Wellenbruches in einer Strömungskraftmaschine aufzuzeigen, ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung.

Die Lösung dieser Aufgabe ist dadurch gekennzeichnet, daß die Drehfrequenzen der beiden Wellenenden in den Wälzlager der hinsichtlich eines Bruches zu überwachenden Welle kontinuierlich und im wesentlichen in Echtzeit ermittelt und miteinander verglichen werden, und daß bei einer gegenüber der Drehfrequenz am Wälzlager des drehmomentaufnehmenden Aggregates höheren Drehfrequenz am turbinenläuferseitigen Wälzlager auf einen Bruch der Welle geschlossen wird. Vorteilhaft Weiterbildungen sind Inhalt der Unteransprüche, insbesondere sind hierin auch vorteilhafte Merkmale einer bevorzugten Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens angegeben.

Die vorliegende Erfindung betrifft vorzugsweise das Problem eines Wellenbruches zwischen dem Fan als drehmomentaufnehmendem Aggregat und dem drehmomentabgebenden Niederdruck-Turbinenläufer eines Flugtriebwerkes bzw. einer Flug-Gasturbinenanlage und die erforderliche Drehzahlbegrenzung des Niederdruck-Turbinenläufers, ist jedoch analog an jeder beliebigen Strömungskraftmaschine einsetzbar. Dabei ist es Ziel, ein solches Verfahren und die dazugehörige Vorrichtung zu verwenden, das auf einer elektromechanischen/elektronischen Ausführung basiert.

Erfindungsgemäß soll daher an einer Welle einer Strömungskraftmaschine, die im wesentlichen jeweils endseitig in Wälzlager gelagert ist, die Drehfrequenz des jeweiligen Wellenendes im jeweiligen Wälzlager bestimmt werden. Unterscheiden sich die Drehfrequenzen der beiden Wellenenden signifikant voneinander, so liegt offensichtlich ein Wellenbruch vor, so daß daraufhin eine geeignete drehzahlbegrenzende Maßnahme eingeleitet wird.

Zwar erscheint dieser Vorschlag auf den ersten Blick relativ einfach, jedoch sind die Anforderungen an die Meßtechnik und an die zugehörige Auswertelektronik äußerst hoch, um die erforderliche Sicherheit bspw. für das Flugtriebwerk zu gewährleisten. Der gesamte Drehfrequenz-Ermittlungsprozess muß nämlich äußerst schnell ablaufen, d. h. die Ermittlung der Drehfrequenzen und die weitere Auswertung sollte in Echtzeit erfolgen, um möglichst kurzfristig auf einen so festgestellten Wellenbruch reagieren zu können. Daher ist bevorzugt für jedes Wälzlager ein getrennt funktionierender Meßkanal zur Bestimmung der Drehfrequenz des jeweiligen Wellenendes in den Wälzlager vorhanden, wobei die beiden Meßkanäle in einem Komparator zwecks Ver-

gleiches der Drehfrequenzen zusammengeführt werden, und wobei die Meßsignalgewinnung, deren Weiterleitung und Verarbeitung bis hin zum Vergleich beider Drehfrequenzen im Echtzeitbereich abläuft. Ebenso in Echtzeit kann dann eine elektrische Stellgröße gebildet werden, die bei einer signifikanten Abweichung zwischen den beiden Drehfrequenzen unverzüglich die geeignete drehzahlbegrenzende Maßnahme einleitet, so beispielsweise ein Brennstoffschlußventil schließt.

Nun bestehen verschiedene Möglichkeiten zur Ermittlung der Drehfrequenzen der Wellenenden in ihren Wälzlager, wobei jedoch gängige Drehzahlsensoren zumeist zu langsam arbeiten, als daß der gesamte Prozeß in Echtzeit durchgeführt werden könnte. Daher kann mittels eines Arithmetik-Prozessors und unter Verwendung einer Fast-Fourier-Transmission für beide Wälzlager über getrennte Meßkanäle die Bestimmung der Drehfrequenz des jeweiligen Wellenendes unter Rückgriff auf eine oder mehrere typische Wälzlagerfrequenzen erfolgen, die von diesen Wälzlager bei deren Rotation emittiert werden. Ein solches Meßverfahren zeichnet sich durch höchste Schnelligkeit und eine der Luftfahrt adäquate Sicherheit aus. Bevorzugt können hierzu über eine Filtereinheit echtzeitgerecht für beide Wälzlager die Rotationsfrequenz des Wälzlager-Käfigs und/oder die Überrollfrequenz des Wälzlager-Außenrings und/oder die Überrollfrequenz des Wälzlager-Innenrings und/oder die Wälzkörperrotationsfrequenz festgestellt und hieraus die Drehfrequenzen der in den Wälzlager gelagerten Wellenenden getrennt bestimmt werden.

Ehe dieses Verfahren anhand eines bevorzugten Ausführungsbeispiels näher erläutert wird sollen jedoch zunächst die physikalischen Gesetzmäßigkeiten, auf denen das verwendete Meßprinzip beruht, beschrieben werden:

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, daß sich die kraftübertragende Welle zwischen dem Fan und dem Niederdruck-Turbinenläufer im wesentlichen an den beiden Wellenenden auf Wälzlager abstützt. Die Rollbewegungen der Wälzkörper im Wälzlagerkäfig erzeugen auf deren Laufflächen periodische Druckkräfte. Infolge der hervorgerufenen Deformationen entstehen periodische Schwingungen. Imperfektionen (z. B. Pitting-Bildung) an den überrollten Flächen wirken vorteilhafterweise verstärkend auf die auftretenden Schwingungen.

Für Wälzlager wurden von Sturm, A. et al. in "Wälzlagerdiagnose an Maschinen und Anlagen", veröffentlicht vom Verlag TÜV Rheinland GmbH 1986 in Köln, die Zusammenhänge zwischen der Lagergeometrie und den typischen Emissionsfrequenzen eines Wälzlagers wie im Folgenden wiedergegeben dargestellt. Dabei wird auf die beigelegten Fig. 2 bis 4 verwiesen, die der genannten Literaturstelle entnommen sind.

Fig. 2 zeigt die Geometrie und die Bewegungsverhältnisse an einem Schrägkugellager unter Verwendung folgender Bezugswerte bzw. Bezeichnungen:

1 = Außenring,

2 = Kugel,

3 = Innenring

$v_A$  = Umfangsgeschwindigkeit des Berührungspunktes A

$v_{KA}$ ,  $v_W$  = Umfangsgeschwindigkeit des Wälzkörpermittelpunktes W

$v_I$  = Umfangsgeschwindigkeit des Berührungspunktes I

$v_{IR}$  = Umfangsgeschwindigkeit der Innenringwälzfläche

$\omega_{IR}$  = Winkelgeschwindigkeit des Innenrings

$\alpha_B$  = Druckwinkel

$n$  = Drehzahl

In Fig. 3 sind die Krümmungsradien eines Rillenkugellagers mit folgenden Bezeichnungen dargestellt:

$r_a$  = Krümmungsradius der Außenringwälzbahn

$r_i$  = Krümmungsradius der Innenringwälzbahn

$r_o$  = Abstand der Krümmungsmittelpunkte

$D_W$  = Durchmesser des Wälzkörpers

Fig. 4 schließlich gibt die Bestimmung des Nenndruckwinkels  $\alpha_0$  und des Betriebsdruckwinkels  $\alpha_B$  für Schrägkugellager wieder.

Damit ergeben sich für Wälzlager die folgenden in Form von Gleichungen (A) bis (E) angegebenen charakteristischen Frequenzen für den Fall des idealen Rollens:

(A): Rotationsfrequenz des Käfigs:

$$f_{KA} = \frac{1}{2} f_n \cdot \left( 1 - \frac{D_W}{D_T} \cos \alpha_B \right)$$

(B): Überrollfrequenz des Außenrings

$$f_A = \frac{1}{2} f_n \cdot z \cdot \left( 1 - \frac{D_W}{D_T} \cos \alpha_B \right)$$

(C): Überrollfrequenz des Innenrings:

$$f_I = \frac{1}{2} f_n \cdot z \cdot \left( 1 + \frac{D_W}{D_T} \cos \alpha_B \right)$$

(D): Wälzkörperrotationsfrequenz:

$$f_{WA} = \frac{1}{2} f_n \cdot \frac{D_T}{D_W} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D_W}{D_T} \cdot \cos \alpha_B \right)^2 \right]$$

(E): Überrollfrequenz einer Kugelunregelmäßigkeit auf beiden Wälzbahnen:

$$f_W = 2 f_{WA} = f_n \cdot \frac{D_T}{D_W} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D_W}{D_T} \cdot \cos \alpha_B \right)^2 \right]$$

Dabei wird in den Gleichungen (A) bis (E) mit  $f_n$  die Drehfrequenz des jeweiligen Wellenendes im Wälzlager und mit  $z$  die Wälzkörperanzahl bezeichnet.

Für ein Rillenkugellager mit radialer und axialer Belastung gilt für den sog. Betriebsdruckwinkel  $\alpha_B$  gemäß Fig. 3 und 4 der folgende Zusammenhang:

$$\sin \alpha_B = \frac{\sin \alpha_0 + \Delta a / r_o}{\sqrt{\cos^2 \alpha_0 + (\sin \alpha_0 + \Delta a / r_o)^2}}$$

Im Übrigen genügen Wälzlager ohne axiale Belastung ebenfalls den Gleichungen (A) bis (E), wobei  $\alpha_B = 90^\circ$  gilt.

Weitere Bestandteile des Schwingungsspektrums können auch durch Anregungen außerhalb des Wälzlagers hervorgerufen werden. Als permanente konstante Resonanzen bilden sich die Geber- und die Koppelresonanz ab. Ein typisches Schwingungsspektrum für ein Wälzlager mit einem Beschleunigungsaufnehmer als Meßsignalaufnehmer zeigt Fig. 5.

Die nähere Beschreibung der Erfindung erfolgt nun anhand eines bevorzugten Ausführungsbeispiels an einem zweiwelligen Flugtriebwerk bzw. an einer grundsätzlich üblichen Zweiwellen-Flug-Gasturbinenanlage, die stark vereinfacht in Fig. 6 dargestellt ist:

Das in Fig. 6 dargestellte Flugtriebwerk besteht aus einem Hochdrucksystem 1 und einem Niederdrucksystem 2,

die mit Wellen 3 und 4 zur Kraftübertragung ausgestattet sind. Die beiden Wellen 3, 4 sind mechanisch nicht miteinander verbunden und drehen sich somit unabhängig voneinander. Das Niederdrucksystem 2 besteht aus dem Fan 2a, dem Rotor der Boosterstufe 2b und dem Niederdruck-Turbinenläufer 2c, die über die Welle 3 miteinander verbunden sind. Über die Welle 4 hingegen sind der Hochdruckkompressorläufer 1a und der Hochdruck-Turbinenläufer 1b miteinander verbunden.

Kommt es nun aufgrund von Überbeanspruchung infolge eines äußeren Ereignisses wie Vogelschlag, Werkstoffermüdung oder anderer Ursachen zu einem Bruch der Welle 3, so ist der Niederdruck-Turbinenläufer 2c ohne Last. Die Folge ist ein unkontrolliert schnelles Anwachsen der Drehzahl des Niederdruck-Turbinenläufers 2c. Dabei kann innerhalb kürzester Zeit die maximal zulässige Drehzahl für den Niederdruck-Turbinenläufer 2c überschritten werden. Infolge der zentrifugalen Überbeanspruchung und der nicht mehr ausreichenden Festigkeit kann es zu einer Zerstörung durch plötzliches Explodieren des Niederdruck-Turbinenläufers 2c kommen. Die kinetische Energie der Bruchstücke des Niederdruck-Turbinenläufers 2c kann dabei ein solches Niveau erreichen, daß das Gehäuse 5 des Flugtriebwerkes durchschlagen werden kann, so daß infolge eines solchen Ereignisses die Flugsicherheit des betreffenden Luftfahrzeuges und deren Passagiere bis hin zu einem Absturz akut gefährdet ist.

Diese Probleme können dadurch vermieden werden, daß bei einem Bruch der Welle 3 eine unmittelbare, nahezu verzögerungsfreie Brennstoffschnellabschaltung initiiert wird, um hierdurch der Niederdruckturbine 2c keine weitere Energie zuzuführen. Infolge der inneren Reibungsvorgänge im Flugtriebwerk wird der Niederdruck-Turbinenläufer 2c bis hin zum Stillstand abgebremst. Das dazu vorgeschlagene Verfahren und die dazu notwendige Vorrichtung ist der Fig. 1 zu entnehmen, worin nochmals das Flugtriebwerk sowie in einem vereinfachten Flußdiagramm das erfindungsgemäße Verfahren zum Erkennen eines Wellenbruchs und zur bejahendenfalls durchzuführenden Brennstoffschnellabschaltung dargestellt ist.

Wie ersichtlich, ist die Welle 3 auf der Seite des drehmomentaufnehmenden Aggregates in Form des Fans 2a und der Boosterstufe 2b über ein als Rillenkugellager ausgebildetes Wälzlager 6 gelagert. Auf der Seite des drehmomentabgebenden Niederdruck-Turbinenläufers 2c ist die Welle 3 über ein Wälzlager 7 mit zylindrischen Wälzkörpern gelagert.

Am fanseitigen Wälzlager 6 sind zwei Meßsignalaufnehmer 8a und 8b in Form von Beschleunigungsaufnehmern angekoppelt. Auch am turbinenläuferseitigen Wälzlager 7 sind zwei derartige als Beschleunigungsaufnehmer ausgebildete Meßsignalaufnehmer 9a und 9b vorgesehen. Dabei ist insbesondere aus Gründen einer verbesserten Funktionszuverlässigkeit die genannte redundante Anordnung der Beschleunigungsaufnehmer an den Wälzlager 6, 7 vorgesehen. Somit ist bei Ausfall eines einzelnen Beschleunigungsaufnehmers 8a oder 8b bzw. 9a oder 9b ein zweiter solcher vorhanden, der ein Meßsignal bereitstellt.

Für die beiden Wälzlager 6 und 7 ist jeweils ein separater Meßkanal in identischer Ausführung vorgesehen. Da nur ein einziges Meßsignal pro Wälzlager 6 bzw. 7 benötigt wird, werden die beiden Meßsignalaufnehmer 8a und 8b auf ein ODER-Glied 10 aufgeschaltet. In analoger Weise ist für die Meßsignalaufnehmer 9a und 9b ein ODER-Glied 11 zuständig.

Diese ODER-Glieder 10 und 11 verläßt jeweils ein komplexperiodisches Meßsignal im Zeitbereich, das den jeweiligen Wälzlager 6 und 7 zuzuordnen ist. Mittels einer Fast-

Fourier-Transmission (wie üblich "FFT" genannt) werden anschließend die anstehenden Signalfunktionen  $\{f(t) = f(t + nT), n = 0; 1; 2 \dots\}$  vom Zeitbereich in den Frequenzbereich gewandelt. Wie üblich bezeichnet dabei "t" einen Zeitpunkt und "T" die Periodendauer der periodischen Funktion.

Die Grundgleichungen für ein fouriertransformiertes komplexperiodisches Meßsignal sind dem entsprechenden Fachmann bekannt und werden daher hier nicht wiedergegeben. Erwähnt sei lediglich, daß die Fouriertransformation durch die FFT-Prozessoren 12 und 13 vorgenommen wird.

Die Fourier-transformierte Meßfunktion liegt nun in Form der Frequenzdarstellung vor. Würde hingegen die Berechnung als diskrete Fourier-Transformation erfolgen, so läge der Rechenaufwand nicht mehr im echtzeitfähigen Bereich. Daher verwendet man Rekursionsformeln, die den Rechenaufwand um den Faktor  $10^3$  verkürzen. Ausgereifte Verfahren für diese Fast-Fourier-Transmission stehen in unterschiedlichen Versionen zur Verfügung. Durch die FFT-Prozessoren 12 und 13 wird diese Aufgabe echtzeitgerecht abgewickelt.

Anschließend passieren die so aufbereiteten Meßwertfunktionen, die eine erhebliche Datenreduktion ohne Informationsverlust erfahren haben, die Filter 14 und 15. Dabei sind diese Filter 14, 15 so ausgelegt, daß sie nur ein Frequenzband von 0 Hz bis zur maximalen Frequenz passieren lassen, die sich nach der weiter oben (in Zusammenhang mit den Fig. 2-4) angegebenen Gleichung (C), die die Überrollfrequenz des Wälzlager-Innenringes wiedergibt, ermittelt. Dabei entspricht der Wert  $f_n$  in dieser Gleichung (C) der maximal zulässigen Drehfrequenz des Niederdruck-Turbinenläufers 2c. Die genannte Filterung erfolgt dabei nahezu verzögerungsfrei unter Echtzeitbedingungen.

Das vorverarbeitete und gefilterte Meßwertergebnis wird dann den Arithmetikprozessoren 16 und 17 zur Verfügung gestellt. Beide Arithmetikprozessoren 16 und 17 arbeiten unabhängig voneinander und haben eine Datenverarbeitungsgeschwindigkeit, die Echtzeitanforderungen gerecht wird. Durch die Arithmetikprozessoren 16 und 17 können durch nicht näher beschriebene Berechnungsverfahren aus den zur Verfügung gestellten Amplitudenspektren jeweils für die Wälzlager 6 und 7 die folgenden Werte ermittelt werden, nämlich

- die Rotationsfrequenz des Käfigs,
- die Überrollfrequenz des Außenringes,
- die Überrollfrequenz des Innenringes und
- die Wälzkörperrotationsfrequenz.

Aus diesen voranstehend aufgelisteten Frequenzen errechnen die Arithmetikprozessoren 16 und 17 nach den weiter oben angegebenen Gleichungen (A) bis (D) jeweils gesondert die Drehfrequenz  $f_{n1}$ , am Wälzlager 6 sowie die Drehfrequenz  $f_{n2}$  am Wälzlager 7. Dabei entspricht die Drehfrequenz  $f_{n1}$  derjenigen des drehmomentaufnehmenden Aggregates bzw. Fans 2a und die Drehfrequenz  $f_{n2}$  derjenigen des Niederdruck-Turbinenläufers 2c.

Aufgrund der Physik des Meßprozesses handelt es sich hierbei um vier zueinander redundante Frequenzinformationen, die alle auf die sog. Anregungsfrequenz  $f_n$  zurückgeführt werden können. Somit weist das Meßsignal an sich einen hohen Sicherheitsstandard hinsichtlich Redundanz und Genauigkeit der Meßinformation auf. Aufgrund der Normalverteilung des Meßfehlers statistischer Meßprozesse können die Arithmetikprozessoren 16 und 17 einem Vergleich der nach den Gleichungen (A) bis (D) bestimmten Drehfrequenzen für die Wälzlager durchführen, wobei eine vorher definierte Streubreite nicht überschritten werden darf.

Bevorzugt wird die Gauß'sche Methode der kleinsten Fehlerquadrate zur Bestimmung der Effektivwerte  $f_{n1}$  und  $f_{n2}$  und der Standardabweichungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  der Meßergebnisse angewandt, die dann für eine anschließende Bewertung zugrunde gelegt werden. Damit liegt für beide Wälzlager 6, 7 die Drehfrequenzinformation in der Form  $\{f_{n1} \pm \sigma_1\}$  und  $\{f_{n2} \pm \sigma_2\}$  vor.

Diese beiden Informationen werden daraufhin zur Bewertung einem Komparator 18 zugeführt, der ebenfalls echtzeitfähig ist. Dabei ist es nicht erheblich, ob der Vergleich bei der Drehfrequenzen  $f_{n1}$ ,  $f_{n2}$ , mittels Hardware oder/und Software realisiert wird. Wesentlich ist nur die echtzeitgerechte Verarbeitung der Informationen. Im Ergebnis des Vergleiches werden die Drehfrequenzen  $\{f_{n1} \pm \sigma_1\}$  und  $\{f_{n2} \pm \sigma_2\}$  als gleich bewertet, wenn eine Überlappung der Meßverteilungen in den nachfolgend beschriebenen Grenzen festgestellt wird.

Die Fälle  $\{f_{n1} + \sigma_1\} = \{f_{n2} - \sigma_2\}$  und  $\{f_{n2} + \sigma_2\} = \{f_{n1} - \sigma_1\}$  gelten dabei als Grenzfälle der Übereinstimmung.

Liegt nun gemäß den vorangestellten Bedingungen eine Übereinstimmung der Drehfrequenz  $f_{n1}$  des Fans 2a und der Drehfrequenz  $f_{n2}$  des Turbinenläufers 2c vor, so besteht keine Veranlassung, eine geeignete drehzahlbegrenzende Maßnahme, insbesondere eine Schnellabschaltung bezüglich des der Brennkammer 23 des Flugtriebwerkes zugeführten Brennstoffes vorzunehmen.

Sollte allerdings der Vergleich ergeben, daß  $\{f_{n1} + \sigma_1\}$  kleiner als ( $<$ )  $\{f_{n2} - \sigma_2\}$  ist, so kann davon ausgegangen werden, daß ein Bruch der Welle 3 stattgefunden hat. Dieser Zustand erfordert dann die Einleitung einer drehzahlbegrenzenden Maßnahme, insbesondere die Sicherheitsschnellabschaltung der Brennstoffzufuhr, die mittels einer Brennstoff-Ringleitung 19 erfolgt.

Dabei ist der Zufluß zu der Brennstoff-Ringleitung 19 mit einem Kraftstoff-Schnellschlußventil 20 ausgerüstet. Dieses mit einem nicht näher dargestellten elektromagnetischen Stellantrieb 22 versehene Kraftstoff-Schnellschlußventil 20 wird mittels einer Feder 21 im elektrisch spannungslosen Zustand stets geschlossen gehalten.

Bei einer Übereinstimmung der Drehfrequenzen  $f_{n1}$ ,  $f_{n2}$  bzw.  $\{f_{n1} + \sigma_1\}$ ,  $\{f_{n2} - \sigma_2\}$  der an beiden Wälzlager 6 und 7 wird somit das Kraftstoff-Schnellschlußventil 20 unter elektrischer Spannung gehalten und ist im geöffneten Zustand.

Tritt jedoch der Fall  $f_{n1} < f_{n2}$  bzw.  $\{f_{n1} + \sigma_1\} < \{f_{n2} - \sigma_2\}$  ein, so wird ein Stellsignal durch den Komparator 18 gebildet, das umgehend und ohne Verzögerung den spannungslosen Zustand am Magnet-Stellantrieb 22 herstellt. Das Kraftstoff-Schnellschlußventil 20 schließt dann augenblicklich unter der Wirkung der Vorspannkraft der Feder 21. Resultierend erlöscht der Verbrennungsprozeß in der Brennkammer 23, nachdem dann kein weiterer Brennstoff zugeführt wird. Über interne Reibungsvorgänge wird der Niederdruck-Turbinenläufer 2c daraufhin an einem weiteren unkontrollierten Anstieg seiner Drehzahl gehindert und bis zum Stillstand abgebremst.

Mit dem beschriebenen Verfahren ist es somit möglich, die Verzögerungszeit von elektronischen/elektrischen Systemen zur Drehzahlbegrenzung einer Strömungskraftmaschine derart zu verringern, daß sie auch für solche und insbesondere für Flug-Gasturbinenanlagen mit geringen Trägheitsmomenten eingesetzt werden können. Eine Ansprechverzögerung für die Drehzahlbegrenzung und Sicherheitsschnellabschaltung in Höhe vergleichbarer direkt wirkender mechanischer Systeme für Flugtriebwerke schafft die Voraussetzung für folgende Vorteile:

- signifikant geringerer Masseeinsatz bei den Bauteilen zur Sicherung der Funktion Drehzahlbegrenzung/

Sicherheitsschnellabschaltung bei Wellenbruch zwischen Fan und Niederdruckturbine,

- aufgrund der Masseneinsparung ergeben sich geringere Betriebskosten für Flugtriebwerke,
- besseres Masse-Kostenverhältnis im Vergleich zu mechanisch wirkenden Drehzahlbegrenzungseinrichtungen/Sicherheitsschnellabschaltung,
- Sicherstellung der Funktion ohne unnötige Zerstörung von Bauteilen und Baugruppen zum Aufbau der Zwangskräfte zum Abbremsen und zum Abbau der überschüssigen Rotationsenergie,
- kostengünstiger realisierbar als bestehende mechanische Lösungen,
- Anwendung des Kommonalitätskonzeptes für Hersteller von Triebwerksfamilien
- keine sicherheitsbedingten Kompromisse hinsichtlich der Aerodynamik von Turbinenbeschaufelungen,
- geringere Betriebskosten aufgrund des besseren spezifischen Brennstoffverbrauches bei optimal aerodynamisch gestalteter Beschaufelung der Niederdruckturbine
- das beschriebene Verfahren bzw. eine nach diesem Verfahren arbeitende Vorrichtung ist nachrüstbar.

Eine vergleichbare Zuverlässigkeit gegenüber direkt wirkenden Systemen ist abgesichert durch entsprechende Redundanzen der Meßstellen, der Meßsignalinformationen und deren Verarbeitung. Dabei können durchaus eine Vielzahl von Details auch abweichend vom beschriebenen Ausführungsbeispiel gestaltet sein, ohne den Inhalt der Patentansprüche zu verlassen.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Erkennen eines Wellenbruches in einer Strömungskraftmaschine mit dem Ziel, danach eine geeignete drehzahlbegrenzende Maßnahme, insbesondere eine Brennstoffschnellabschaltung bei einer Flug-Gasturbinenanlage, einzuleiten, wobei ein drehmomentabgebender Turbinenläufer und ein drehmomentaufnehmendes Aggregat über die hinsichtlich eines Bruches zu überwachende, im wesentlichen endseitig in zumindest zwei Wälzlager (6, 7) gelagerte Welle (3) miteinander verbunden sind, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Drehfrequenzen ( $f_{n1}$ ;  $f_{n2}$ ) der beiden Wellenenden in den Wälzlager (6, 7) kontinuierlich und im wesentlichen in Echtzeit ermittelt und miteinander verglichen werden, und daß bei einer gegenüber der Drehfrequenz ( $f_{n1}$ ) am Wälzlager (6) des drehmomentaufnehmenden Aggregates höheren Drehfrequenz ( $f_{n2}$ ) am turbinenläuferseitigen Wälzlager (7) auf einen Bruch der Welle (3) geschlossen wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß für jedes Wälzlager (6, 7) ein getrennt funktionierender Meßkanal zur Bestimmung der Drehfrequenz ( $f_{n1}$ ;  $f_{n2}$ ) des jeweiligen Wellenendes in den Wälzlager (6, 7) vorhanden ist und die beiden Meßkanäle in einem Komparator (18) zwecks Vergleiches der Drehfrequenzen ( $f_{n1}$ ;  $f_{n2}$ ) zusammengeführt werden, wobei die Meßsignalgewinnung, Weiterleitung und Verarbeitung bis hin zum Vergleich beider Drehfrequenzen ( $f_{n1}$ ;  $f_{n2}$ ) im Echtzeitbereich abläuft und in Echtzeit eine elektrische Stellgröße gebildet wird, die bei einer signifikanten Differenz zwischen den beiden Drehfrequenzen ( $f_{n1}$ ;  $f_{n2}$ ) unverzüglich die genannte geeignete drehzahlbegrenzende Maßnahme einleitet, insbesondere ein Brennstoffschnellschlußventil (20) unverzüglich schließt.



3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei das an den Wälzlager (6, 7) mittels Meßsignalaufnehmern (8a, 8b, 9a, 9c) ermittelte Meßsignal eine Redundanz in der Meßinformation enthält und vorzugsweise ein komplexperiodisches Signal ist. 5
4. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei das komplexperiodische Meßsignal  $\{f(t) = f(t + nT) \text{ mit } n = 0; 1; 2 \dots\}$  vom Zeitbereich in den Frequenzbereich mittels Fast Fourier Transmission echtzeitgerecht in ein Amplitudenspektrum überführt wird. 10
5. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei über eine Filtereinheit (14, 15) echtzeitgerecht für beide Wälzlager (6, 7) die Rotationsfrequenz des Wälzlager-Käfigs und/oder die Überrollfrequenz des Wälzlager-Außenrings und/oder die Überrollfrequenz des Wälzlager-Innenrings und/oder die Wälzkörperrotationsfrequenz festgestellt und hieraus die Drehfrequenzen ( $f_{n1}$ ;  $f_{n2}$ ) der in den Wälzlager (6, 7) gelagerten Wellenenden bestimmt werden. 15 20
6. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei echtzeitgerecht mittels eines Arithmetik-Prozessors (16, 17) für beide Wälzlager (6, 7) über getrennte Meßkanäle die Bestimmung der Drehfrequenz ( $f_{n1}$ ;  $f_{n2}$ ) des jeweiligen Wellenendes unter Rückgriff auf eine oder mehrere typische Wälzlagerfrequenzen erfolgt, die von den Wälzlager (6, 7) bei deren Rotation emittiert werden. 25
7. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei bei Verwendung von mehr als einer typischen Wälzlagerfrequenz die Bestimmung der Drehfrequenzen ( $f_{n1}$ ;  $f_{n2}$ ) nach der Gauß'schen Methode der kleinsten Fehlerquadrate in der Form ( $f_{n1} \pm \sigma_1$ ) und ( $f_{n2} \pm \sigma_2$ ) erfolgt. 30
8. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei im möglichen Drehzahlbereich der beiden Wälzlager (6, 7) bei Auftreten einer signifikanten Differenz zwischen den beiden Drehfrequenzen ( $f_{n1}$ ;  $f_{n2}$ ) ein Schnellschluß des ansonsten unter elektrischer Spannung stehenden und dabei geöffnet Brennstoff-schnellschlußventils (20) durch unverzügliche Spannungslösschaltung erfolgt. 35 40
9. Verfahren nach Anspruch 7 und 8, dadurch gekennzeichnet, daß im möglichen Drehzahlbereich der beiden Wälzlager (6, 7) von  $\{f_{n2} + \sigma_2 = f_{n1} - \sigma_1\}$  bis  $\{f_{n1} + \sigma_1 = f_{n2} - \sigma_2\}$  das Brennstoff-schnellschlußventil (20) unter elektrischer Spannung steht und geöffnet ist und daß ein Schnellschluß des Brennstoff-schnellschlußventils (20) durch unverzügliche Spannungslösschaltung erfolgt, wenn die Bedingung  $\{f_{n1} + \sigma_1 < f_{n2} - \sigma_2\}$  erfüllt ist. 45 50
10. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei an beiden Wälzlager (6, 7) jeweils zumindest zwei Meßsignalaufnehmer (8a, 8b, 9a, 9c) angebracht sind, deren Anordnung und Funktion je Wälzlager (6, 7) redundant ausgeführt ist und wobei es sich bei den Meßsignalaufnehmern (8a, 8b, 9a, 9c) um Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsaufnehmer jeweils gleichen Typs handelt. 55 60
11. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei das drehmomentaufnehmenden Aggregat (6) ein Verdichter, ein Fan, ein Booster, ein Propeller oder eine Kombination hiervon ist. 65
12. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei das Brennstoff-Schnellschlußventil (20) federbelastet

ist und mittels einer stromdurchflossenen elektromagnetischen Stellanrichtung (22) im geöffneten Zustand gehalten wird.

---

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

---

- Leerseite -

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

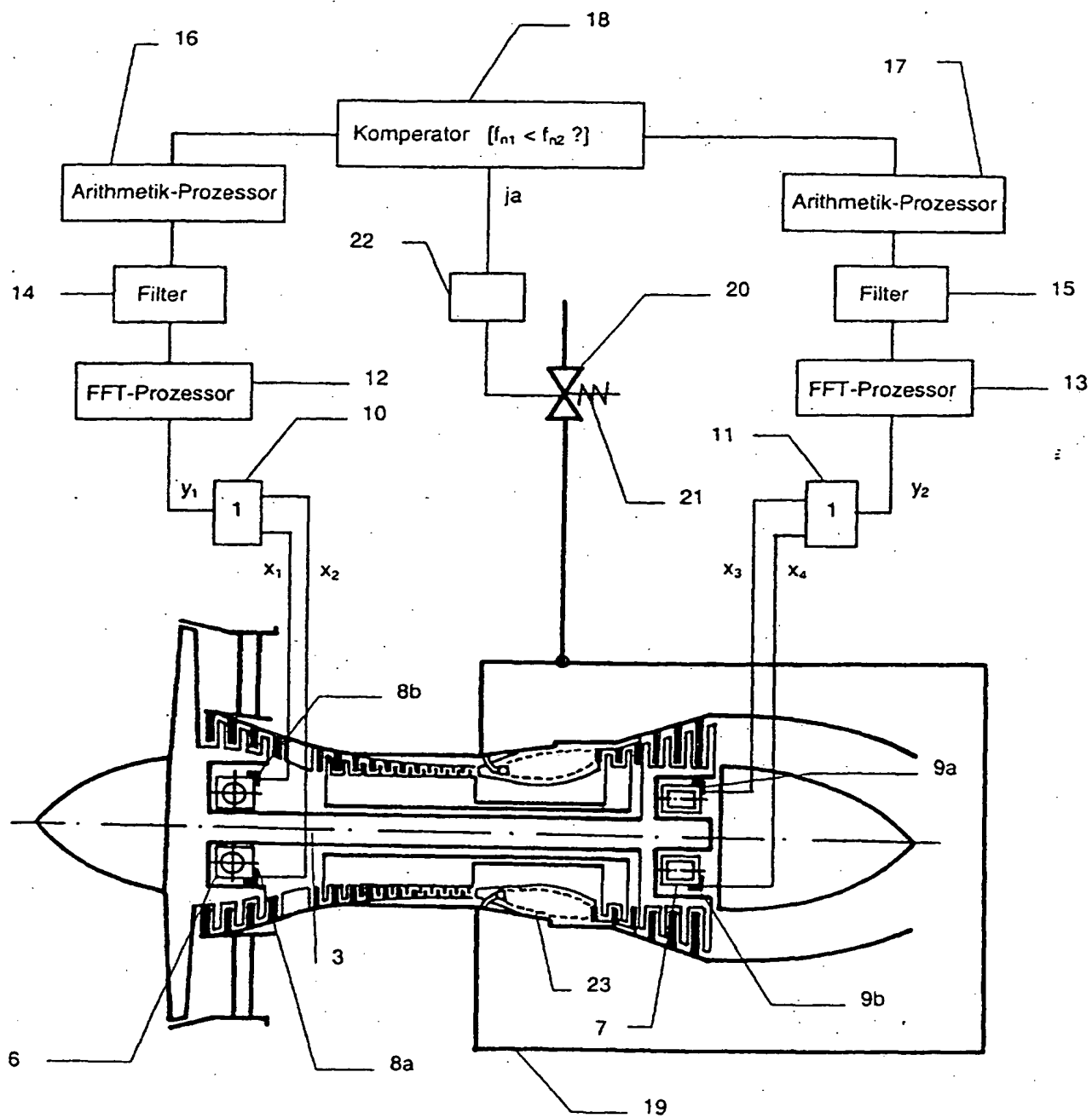


Fig. 1

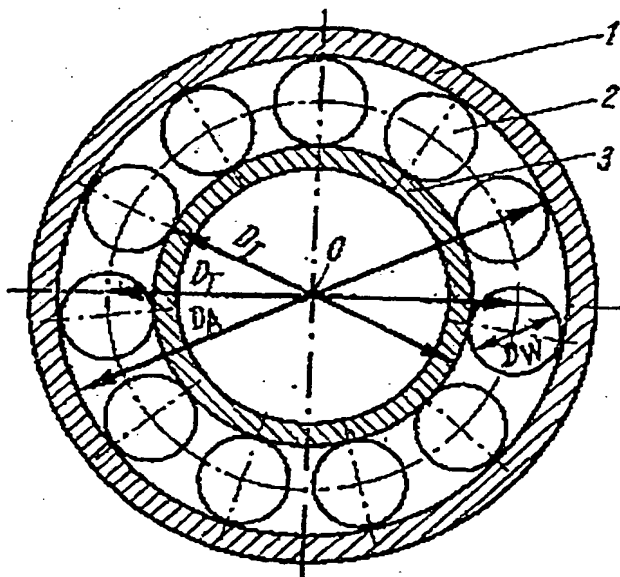


Fig. 2

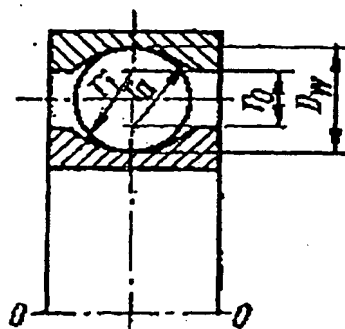
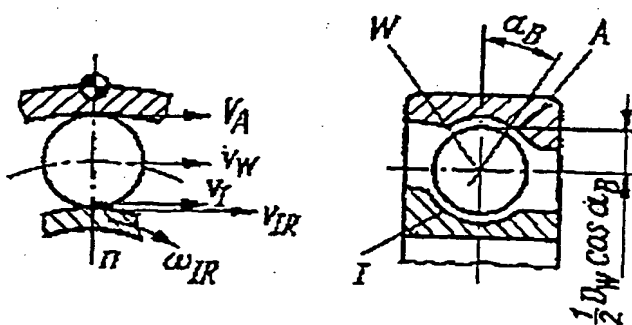


Fig. 3

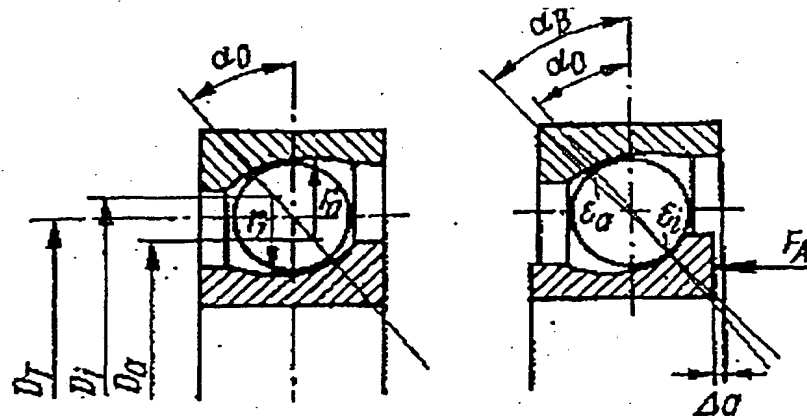


Fig. 4

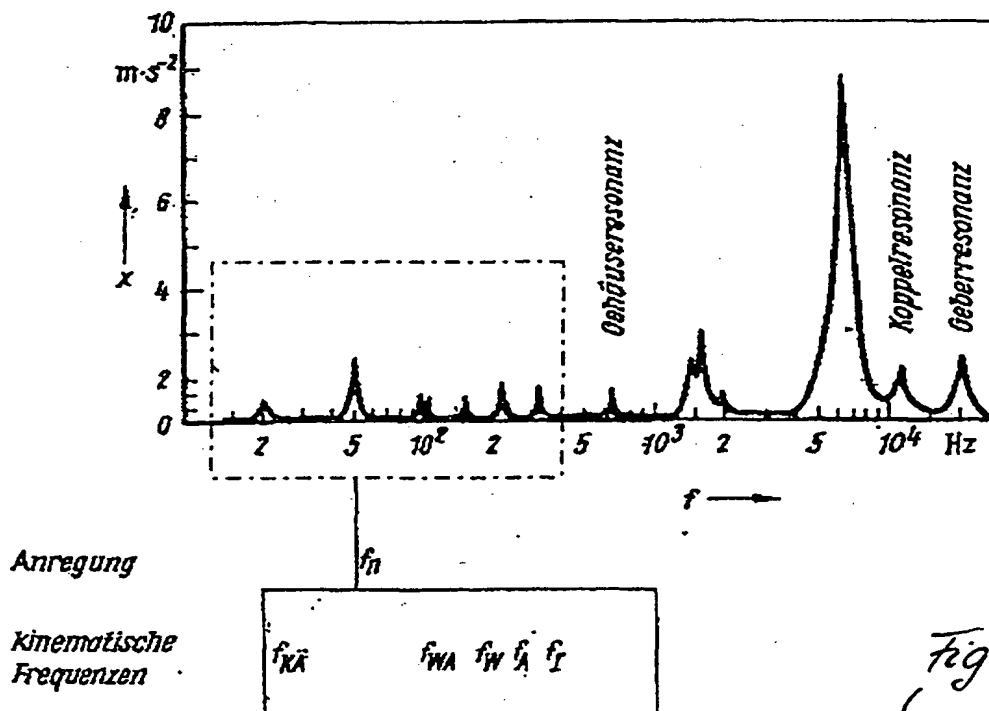


Fig. 5

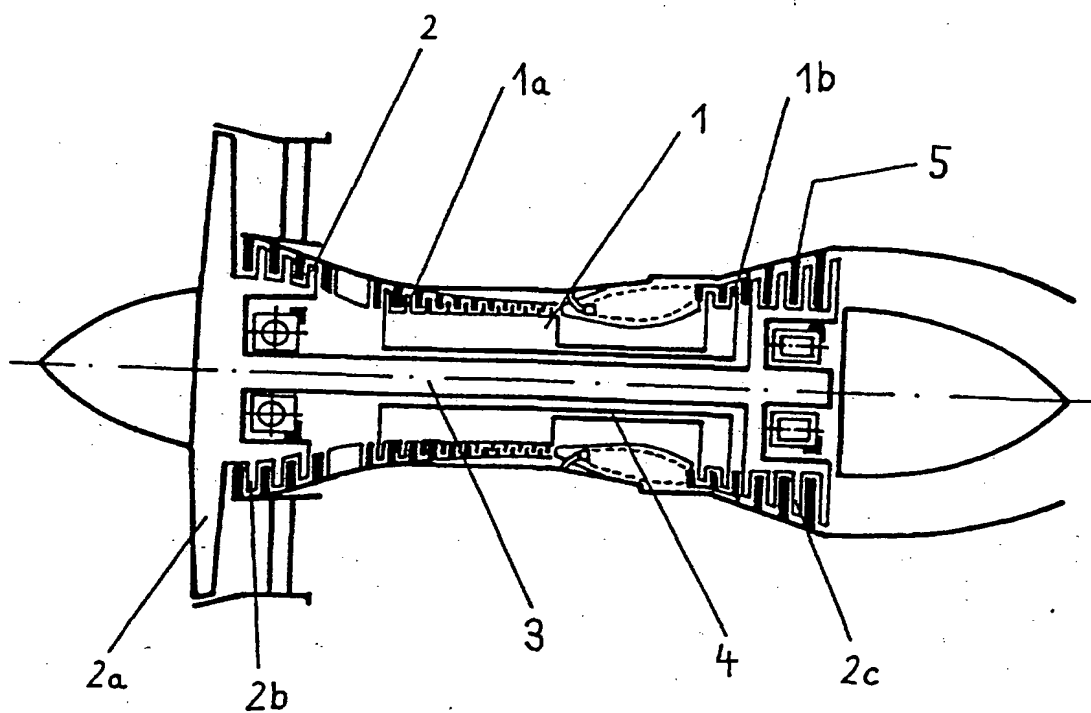


Fig. 6